

## Al 7075 반응고 단조품과 열간단조품의 특성 비교

이 상 용, 이 정 환, 이 영 선, 전 재 일\*, 신 평 우\*

한국기계연구원 재료공정연구부

\* 창원대학교 재료공학과

### Characteristics of Thixoforged Parts and Hot-Forged Parts of Al 7075

Sang-Yong Lee, Jung-Hwan Lee, Young-Sun Lee, Jae-Il Jun\*, Pyung-Woo Shin\*  
Dept. of materials processing, Korea Institute of Machinery and Materials

\* Dept. of materials engineering, Changwon National University

#### 1. 서 론

고비강도를 나타내면서도 경량이고, 환경 친화적인 구조재료에 대한 수요증대에 따라 같은 특성을 가진 철계 소재에 비해 40%정도 경량화가 가능하고 또한 리사이클링을 통한 재활용 비용이 매우 높은 고강도 알루미늄 단조품의 적용은 점차 증가하고 있다. 그러나 고강도 알루미늄 합금은 성형성이 낮기 때문에 복잡 형상 구조물을 위한 단조품 제조시 기존의 열간 단조 공정(그림 1-[A])에 의해서는 대부분 다단계의 단조 공정을 통해 제조되게 되는데 이때 심한 Bur의 형성으로 인한 원소재의 낭비, 중간가공 및 가열공정을 통한 생산성감소 등과 같은 경제적인 측면에서의 경쟁력이 떨어지고 또한 품질의 제어가 용이하지 않은 문제점이 있다. 따라서 최근의 고강도 Al 합금 단조품의 응용증대를 위한 단조기술 개발은 경량화, 고강도, 우수한 성형성, 원소재 절약 및 생산성 향상과 같은 상치되는 조건들을 모두 만족시킬 수 있는 방향으로 시도되고 있으며, 궁극적으로 경쟁력 있는 새로운 정형제조(Near-Net Shape Manufacturing) 기술을 적용하거나 기존 정밀단조 공정을 개선하는 방향으로 이루어지고 있다. 최근 반응고 금속 성형(Semi-Solid Metal Forming) 기술은 기존의 주조 및 단조의 단점을 보완하고 장점을 살릴 수 있는 새로운 정형제조 기술로서 각종 성형 분야에 실용화 또는 상업화가 활발히 이루어지고 있다(그림 1-[C]). 1970년대초 그 원리가 발견된 이후 주로 주조분야에 실용화가 선행되었으나 최근에는 단조분야에도 적용능력이 확대되고 있다. 현재까지의 실용화 수준으로 볼 때 Al-Si 합금이 우선적으로 이루어졌으나, Al-wrought 합금 특히 성형성이 낮은 고강도 Al 합금에의 적용도 시도되고 있다. 기존의 정밀단조 공정개선 방향은 여러 가지가 있으나 단조가열 온도를 용체화처리 온도 수준으로 높여 성형성을 향상시켜 단조횟수를 1회로 줄이고, 또한 단조가열에 의해 용체화를 동시에 수행한 다음 단조 후 조절냉각을 통한 시효처리를 일괄 공정으로 수행함으로써 공정단계를 크게 축소시켜(그림 1-[B]) 생산성 향상, 원가절감, 성형성 향상의 효과를 동시에 꾀하는 방법이 많은 관심을 끌고 있다.

알루미늄 정밀단조는 수요와 응용이 증가추세에 있으면서도 이직도 많은 부분의 Know-How가 밝혀지지 않거나 체계화되지 못하고 있는 실정이다. 이는 AI 단조품의 특성이 가공열처리의 많은 변수들에 의해 복합적으로 크게 좌우되고 따라서 정밀단조를 위해서는 온도, 성형속도, 가공도 등의 정밀제어가 필수적인데 이와 같은 조건들은 합금원소의 변화에 매우 민감하게 영향을 받기 때문이다. 따라서 성공적인 정밀단조를 위해서는 조성을 비롯한 각종 가공변수들의 영향에 대한 조직, 성형성, 기계적 특성의 변화를 체계적이고 정밀한 기초 데이터가 확보되어 있어야 한다.

본 연구에서는 고강도 AI 합금 복잡 형상 구조물을 정형 제조할 수 있는 단조기술로서 위에 언급한 반응고 단조기술과 One-Step 정밀단조 기술의 적용을 목표로 AI 7075 합금에 대해 조직, 성형성, 기계적 특성 측면에서 그 가능성 여부를 1차적으로 분석하는 것이 목적이다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 반응고 단조, One-Step Forging, 기존의 Multi-Step Forging을 가능한 상대 비교할 수 있도록 동일한 원소재를 사용하여 중간단계의 공정을 변화시켰다. 원소재로는 연속주조에 의해 178mm직경으로 제조된 봉재를 30mm 직경으로 압출한 AI 7075 봉재(AI-5.5Zn-2.45Mg-1.6Cu-0.5Fe-0.4Si-0.3Mn-0.25Cr-0.2Ti)를 사용하였다. 그림 2에 실험에 사용된 AI 7075 단조소재의 초기조직을 나타내었다. 성형방법은 Upsetting과 Forging을 병행하였다. Upsetting을 위해서는 직경 8mm, 높이 12mm로 시편을 가공하였고, Forging을 위해서는 직경 20mm, 높이 20mm의 원통시편을 사용하였다. Multi-Step Forging에서는 가열 및 단조 온도를 350℃ ~ 480℃ 범위에서 변화시켰고 성형은 2회에 걸쳐 수행하였다. One-Step Forging에서는 가열 및 단조온도를 450℃ ~ 560℃에서 변화시켰다. 반응고 단조를 위해서는 단조가열전에 Swaging에 의한 냉간 가공을 통해 (가공도 27% ~ 95%) 반응고 영역에서의 구상입자 형성 및 입자크기를 제어하였다. 반응고 가열 및 단조 온도는 590℃ ~ 610℃ 범위에서 유지하였다. Multi-Step Forging, One-Step Forging은 50 ton 유압프레스를 이용하여 성형하였고 성형전 가열은 저항가열로에서 1시간 정도 가열후 프레스로 이송하여 성형하였다. 반응고 영역으로의 가열은 고주파 유도 가열장치(5 KW, 350 KHz)를 이용 평균 200℃/min의 승온속도로 가열한 후 시편을 공압에 의해 추진되는 프레스(최대 Ram Speed : 200mm/sec)로 이송한 후 성형하였다. 본 실험에서는 그림 1과 같이 조절 냉각을 적용하지 않고 일단 상온으로 냉각시킨 후 동일한 조건(482℃/3hrs 용체화처리 → W. Q. → 120℃/24hrs 시효처리)에서 시효처리 하였다. 단조 또는 Upsetting시 금형온도는 200℃, 300℃, 400℃로 변화시켰으며 Multi-Step Forging, One-Step Forging, 반응고 단조의 비교는 금형온도 300℃에 대해서 수행되었다. 금형은 흑연계 윤활제를 이용하여 동일한 조건으로 윤활처리 하였다. 시효처리된 Upsetting 시편 또는 단조품에 대해서는 부위별 조직, 경도(HR30T)가 분석되었다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 AI 7075 합금의 가공도 및 온도에 따른 조직변화를 나타내었다. 여기서 가공은

냉간에서의 Swaging을 통해 수행되었으며 가공 후 각각의 온도에서 1시간 동안 가열되었다. 고체상태의 온도영역(400℃ ~ 500℃)과 반응고 온도 영역(590℃)에서의 입자의 형상과 크기가 뚜렷이 구별되고 있다. 고체상태에서는 400℃까지는 재결정이 일어나지 않았고 450℃에서는 부분적으로 재결정이 형성되었음을 볼 수 있다. 같은 온도에서 가공도가 증가할수록 미세한 차이로 입자가 작아지고 동시에 균일해지는 경향을 보이고 있다. 반응고 온도인 590℃에서 가공도의 효과로부터 볼 수 있듯이 52% 이상의 가공도에서는 입자크기가 가공도에 따라 변화하지 않았다. 반응고 온도에서의 입자는 매우 균일한 구상을 나타내고 있고 입계가 뚜렷한 것이 고체상태(450℃ 이상)에서의 조직과 차이이다.

그림 4는 단조공정에 따른 조직과 성형성 단면 사진을 비교하기 위해 나타내었다. 단조품의 형상은 원통형 소재로부터 동일한 금형을 이용하여 단면으로  $\times$ 자 형으로 성형되었으며 단면사진에서는 반쪽인 T자형만 나타내었다. 미세조직은 Rib 부위와 Web 부위에서 동일조건에서 시효처리 후 관찰하였다. 성형성으로 볼 때 예상대로 가열 및 성형온도가 증가할수록 금형 형상에 가깝게 성형되었고 특히 반응고 단조공정 [C]에서는 완전한 충전(Filling) 상태를 얻을 수 있었다. 기존의 Multi-Stage 공정 [A]에서는 Rib과 Web 부위에서 Metal Flow의 차이가 뚜렷이 관찰되고 미세조직의 양상도 크게 구별된다. 단조온도를 500℃로 증가시킨 One-Step Forging [B]에서 Rib 부위의 조직에는 차이가 없으나 Web 부위의 조직은 [A] 공정과 달리 수평방향으로 조밀한 Metal Flow를 나타내었다. 반응고 단조 공정 [C]를 거친 단조품은 Rib과 Web 부위의 조직이 거의 동일하고 성형전의 구상의 입자가 거의 변형되지 않고 그대로 유지되고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 다단계 단조(Multi-Step Forging) 공정으로 성형된 Al 7075 소재에 대해 각각의 공정단계에서의 경도값의 변화를 Upsetting과 Forging에 대해서 나타내었다. 여기서 가열 및 성형온도는 450℃이며, 금형온도는 300℃로 하였다. 1차 성형에서는 Upsetting Ratio로 볼 때 50%, 2차 성형은 80%의 가공도를 나타내도록 성형하였다. 주목할만한 것은 Upsetting의 경우 각각의 공정단계를 거치면서 소재의 경도가 증가하고 있으며 최종 시효처리 후 최대값을 나타내고 있다. 반면 Forging의 경우 단조전 가열에서는 Upsetting시 가열과 같은 경도값을 나타내고 있으나 각각의 단조후의 경도값은 Upsetting후의 경도값과 크게 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 또한 최종 시효처리후의 경도값에는 Forging의 경우가 Upsetting보다 낮게 나타나고 있다. 이와 같은 차이는 각각의 공정 단계에서 얻어지는 미세조직의 차이에 그 원인이 있음을 그림 6에서 알 수 있다. 전체적으로 가열공정 이후 Upsetting과 Forging의 조직의 양상이 차이가 있음을 볼 수 있다. 특히 각각의 성형후의 조직의 차이는 뚜렷하다. 이와 같은 미세조직의 차이를 일으키게 하는 원인은 현재의 결과로는 명확한 해석이 불가능하다. 소재의 크기, 온도와, 금형의 크기 및 온도 그리고 가공도 등이 영향을 미칠 것으로 추정된다. 이와 같은 현상에서 볼 수 있듯이 1차적으로 판단할 수 있는 것은 실제 Forging 공정 조건을 결정하는데 Upsetting 실험 조건을 그대로 적용하는 데는 주의를 기울여야 한다는 것이다. 그림 7에는 One-Step Forging 공정에서 Al 7075 소재를 Upsetting하였을 때 금형온도에 따른 경도를 비교하였다. 소재 가열 및 성형 온도는 500℃였다.

Upsetting 성형시 금형온도가 증가할수록 단조품의 경도는 크게 감소하고 반면 시효처리 후의 경도값은 금형온도의 영향이 없이 거의 유사한 값이 얻어지고 있다. 이것은 다음과 같은 관점에서 중요한 의미를 갖는다. 소재 가열온도가 500℃이고 금형온도가 200℃ 일 때 시효처리 후 경도값에 근접한 경도값을 얻는 것은 곧 단조 후 냉각 및 용체화처리를 거치지 않

더라도 금형온도를 통해 단조 후 직접 시효처리가 가능하다는 것을 보여주는 것이다. 물론 최적단조 가열온도, 적정 냉각속도 및 온도, 단조 속도, 냉각시 유지시간 등에 따라 조직 석출양상에 차이가 있기 때문에 이에 대한 체계적인 데이터를 확보하는 것이 필요하다. 또한 단조품의 형상 즉 금형의 형상과 윤활에 대한 영향도 주요 인자로 고려되어야 한다. 그림 8에는 단조공정에 따른 Al 7075 단조품의 경도를 비교하였다. 단조온도가 증가할수록 단조품의 경도는 크게 감소하였으나 시효처리 후의 경도값은 350℃에서 수행된 Multi-Step Forging과 One-Step Forging 및 Thixoforging에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 즉 조직, 성형성, 경도 측면에서 One-Step Forging 또는 Thixoforging의 경우가 기존의 Multi-Step Forging 보다 유리할 수 있다는 것을 보여주는 결과이다. 특히 Thixoforging의 경우는 부위별로 조직의 차이가 없는 것이 두드러진다. 단지 반응고 단조품에서 조직적인 측면에서 문제점은 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 입자와 입자간에 존재하는 액상으로 인해 성형시 tearing 현상이 쉽게 일어날 수 있으며, 부위별로 액상비율이 차이가 있어 입자간의 결합력에 차이를 일으키게 할 수 있는 점이다. 그림 10에는 반응고 단조 직후의 입계에 존재하는 액상이 시효처리를 통해 정성적인 입계 형태로 변화하고 있는 것을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

Al 7075 합금에 대해 다양한 정밀단조 공정을 적용하여 조직, 성형성, 경도 특성을 비교하였다. 기존의 Multi-Step Forging, 기존 공정을 개선한 One-Step Forging, 새로운 정형 제조 공정으로서 많은 관심을 끌고 있는 Thixoforging공정을 거쳐 제조된 단조품에서 조직의 균일성, 성형성 측면에서 Thixoforging공정이 가장 우수하였고 경도 측면에서도 Thixoforging 또는 One-Step Forging에 의해 제조된 단조품이 상대적으로 저온에서 수행된 Multi-Step Forging에 근접하는 값을 나타냄으로서 새로운 정밀단조 공정으로서 가능성을 보였다. 향후 단조 가열조건, 단조 성형속도, 최적 냉각방법, 강도 특성, 내응력 부식 균열성 등에 대해 더욱 정밀한 비교를 통해 단조품의 소재, 형상등에 적절한 정밀단조 공정을 선정하는 것이 요구된다.

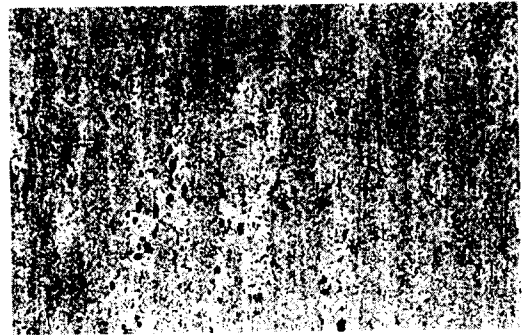
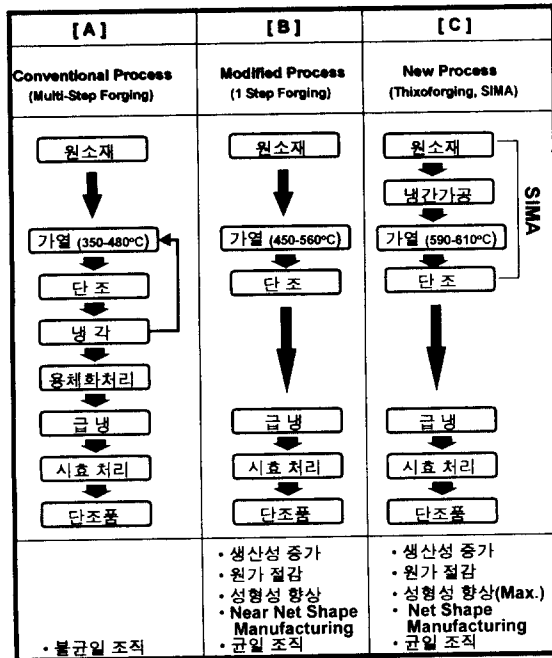


Fig 2. Al 7075 합금 단조용 소재의 초기조직

Fig 1. 고강도 Al 합금의 정밀단조 공정 비교

가공도 \ 가열 온도	400°C	450°C	500°C	590°C
27%				
52%				
85%				

Fig 3. Al 7075합금의 가공도 및 온도에 따른 정적재결정 조직 변화

[ 단조공정 ] 단조온도	단면	Rib	Web
[ A ] 350°C			
[ B ] 500°C			
[ C ] 590°C			

Fig 4. 단조 공정에 따른 성형성 및 조직 비교

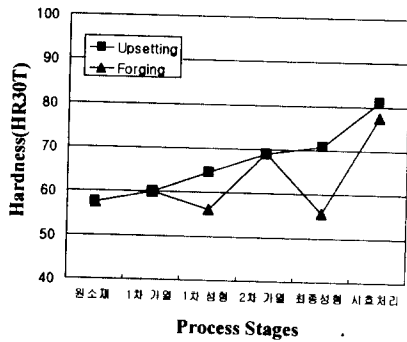


Fig 5. 예비성형을 거치는 단조공정에서 공정 단계별 소재의 경도 변화

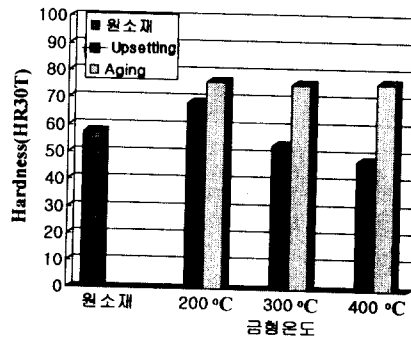


Fig 7. 업세팅 성형된 A17075 합금의 금형온도에 따른 경도 비교

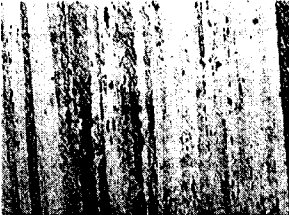
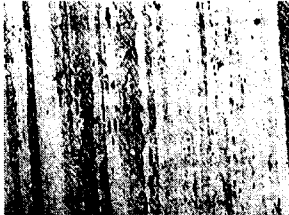

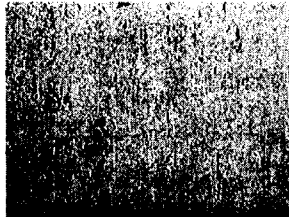

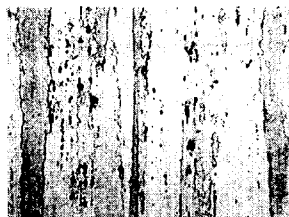



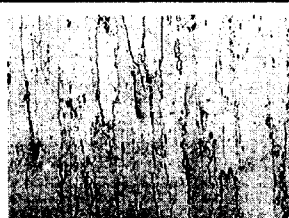
성형공정 성형방법	Upsetting	Forging
1차가열		
1차성형		
2차가열		
2차성형		
시효처리		

Fig 6. Al 7075 합금의 다단계 성형(Multi-Step Forming)시 공정단계별 조직의 변화  
 [ 소재가열 온도 및 성형 온도 : 450oC, 금형 온도 : 300oC ]

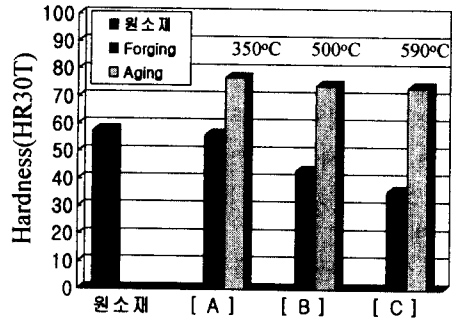


Fig 8. 단조공정에 따른 Al 7075 단조품의 경도 비교

- 금형온도 : 300°C
- [A] : Conventional Forging
- [B] : 1 Step-Precision Forging
- [C] : Thixoforging

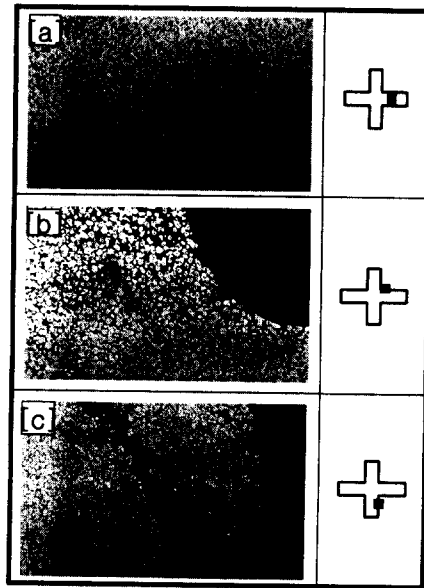


Fig 9. Al 7075 반응고 단조품에서의 부위별 조직  
[원소재 - 냉간가공(Swaging, 52%) - 반응고 단조(소재 : 610°C, 금형 : 300°C)]

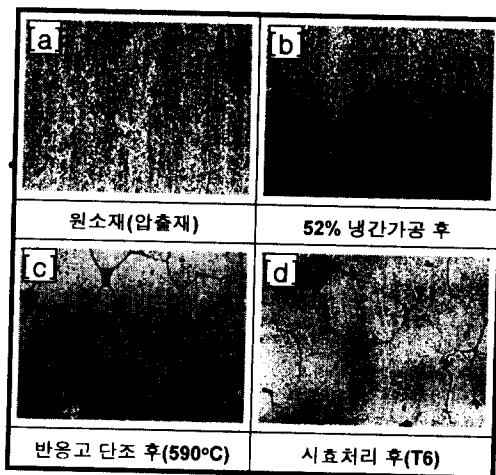


Fig 10. Al 7075 합금의 반응고 단조 공정 단계별 조직